Journal of the Korean Vacuum Society
Vol.12, No.1, 2003, pp.64~69

ccd 카메라를 이용한 금속 용융면의 온도분포측정

노시표† · 정의창 · 임창환 · 김철중

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

(논문접수일 : 2002년 10월 11일)

Measurement of temperature profile in molter metal using a ccd camera

Rho Sipyo†, Euo Chang Jung, Changhwan Lim, and Cheol-Jung Kim

Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received October 11, 2002)

요 약

원자력산업용 소재로 사용되는 가돌로니엄 (Gd, 원자번호 64) 금속을 20 kW 내외의 고출력 전자빔을 이용하여 용융시키고, 그 용융면의 온도 분포를 측정하였다. 광학 필터들과 랜즈구경 크기를 조절하여 용융면에서 발생하는 방사강도를 ccd 카메라로 받아들이고 실시간으로 컴퓨터에 저장하였다. 이 방법을 이용하여 전자빔의 출력에 따른 용융면의 크기를 실시간으로 모니터 할 수 있어 안정적인 전자빔의 동작이 가능하였다. 그리고 가돌로니엄 금속 용융면을 흑체복사로 가정하고 Planck's law를 적용한 결과는 적외선 온도계로 측정한 결과보다 동일한 전자빔 출력에서 100~200 ℃ 높은 값을 보였다.

주제어 : 금속 용융면의 온도분포, 실시간 측정

Abstract

Using a high power electron beam gun (max. power 20 kW), Gadolinium (Gd, atomic number 64) metal was melted and the temperature distribution of melted surface was measured. With proper optical filters and the adjustment of aperture of lens, the radiation of melted surface was received by a ccd camera and its signal transferred to a computer. The real time monitoring of melted surface with a variation of electron beam power was possible and stable operation of electron beam was achieved. It was found that the max. temperature measured by a ccd camera with an assumption of blackbody radiation of melted Gd surface and adaption of Planck's law was above 100~200 ℃ compared to that measured by a pyrometer in the same e-beam power.

Key Words : Temperature progile-molten metal, real-time measurements

1. 서 론

광학 부품의 코팅, 반도체 산업용 고순도 동위원소와 원자력 산업에 소용되는 특정 원소 제조에 있어서 각 조건에 맞는 적절한 원자증기의 발생은 중요하다. 고융점 금속의 경우에는 안정적으로 원자증기를 얻기 위하여 전자빔 가열법을 사용한다 [1,2]. 이 방법은 텅스텐 필라멘트에서 발생한 열전자를 고전압으로 가속시키고, 그 전자빔을 금속의 표면에 집속하여 일정 부위의 온도를 높인다. 이와 같은 전자빔을 이용한 용융법은 수십 kW의 높은 출력으로 사용할 수 있어 재래로 다량의 금속을 정련 · 정재하는데 많이 사용되었다.

이와 같은 응용 가능성을 가진 한 분야로 특정동

† E-mail : sprho@kaeri.re.kr

위원소를 다량으로 갖는 금속이 있다. 예를 들면 가돌로니엄 (Gd, 원자번호 64)는 원자력 발전소에서 핵연료의 연소도를 조절하는 제어봉으로 사용되고 있는 금속이다. 제어봉의 효율을 높이기 위하여 가돌로니엄 중 특정 동위원소의 성분비를 증가시켜야 한다. [4] Gd 금속의 용융점이 1312 ℃로 높기 때문에 전자빔을 사용하여 용융시킨다. 고출력의 장치를 사용함에 있어서 전자빔의 운동에너지가 커서 그 사용에 세심한 주의가 요구되며, 항시 용융면 상태를 관측해야 한다. 재래로 사용되고 있는 관측창 (viewing port)을 통한 직접 들여다보는 방식은 중간에 셔터를 설치하여 사용해도 용융면에서 발생하는 원자증기에 의하여 일정 시간이 지남에 따라 관측창이 코팅된다. 이와 같이 관측창의 유리가 코팅이 진행되면 이를 통하여 관측되는 용융 상태를 알기가 힘들게 되고, 비정상적인 조건에서 전자빔이 도가니의 다른 부위에 입사되어 파손되는 일이 발생할 수 있다. 이를 사전에 방지하기 위하여 용융면을 육안이나 ccd 카메라로 관측하는 방법을 사용한다.

본 논문에서는 용융면에서 방출되는 방사강도를 ccd 카메라로 측정하고, 그 방사강도로부터 대략적인 용융면의 온도 분포를 조사하였다. 즉, Gd 용융면이 이상적인 흑체복사를 한다고 가정하면, 그 면에서 방출된 복사강도로부터 Planck's law를 이용하여 용융면의 온도분포 측정이 가능하다. 위와 같은 방법으로 H. Ohba 등은 Cu 금속의 용융면을 측정하였다 [4]. 본 실험에서는 전자빔 출력이 10 kW 이하의 범위에서 Gd 금속을 용융시키고 용융면의 온도분포를 측정하였다. Gd 금속은 Cu와 달리 기저준위 근처에 다수의 준안정 준위 (meta-stable state)가 존재한다. ccd 카메라로 측정값은 기존의 2색 적외선 온도계를 이용하여 측정한 값과 비교·분석하였다.

2. 실험 방법

아래 그림과 같이 20 kV로 가속된 전자빔을 이용하여 다량의 Gd 금속을 용융시켰다. 전자빔은 도가니의 중심에서 수직인 방향으로부터 15° 벗어난 위치에 있는 필라멘트에서 방출되며 편향코일을 통과하면서 궤적이 바뀌게 된다. 또한 편향코일 하단에 전자석용 코일을 설치하여 시료의 표면으로부터 띠 모양의 원자증기 방출이 가능하게 하였다. 이와 같이 형성된 고출력의 전자빔은 주괴 (ingot) 형상의 Gd 시료에 입사되어 그것을 용융시키며, 이 때 시료에서 방출되는 열은 Cu 재질의 도가니 내부에 흐르는 10 l/min의 냉각수 (유량 : 10 l/min.)에 의하여 냉각되어 진공챔버 외부로 방출된다.

$1*10^{-5}$ torr 이하의 진공도를 형성한 후에 조사된 전자빔에 의하여 녹은 면은 ccd 카메라 (Pulnix, TMC-7)를 통하여 상을 얻었다. 용융체에서 발생하는 방사강도가 일정 수준이상으로 커져서 ccd 카메라의 전기신호가 포화되는 것을 막기 위하여 광학용 흡광도필터 (neutral density filter)를 카메라 앞에 사용하여 방사강도를 줄였다. 전자빔 출력은 20 kW 범위에서 사용하였으며, 광학밀도 (optical density) 1.0~3.0 정도의 흡광도필터를 사용하였으며, 상의 밝기에 맞추어 zoom lens의 f number를 조절하여 과도한 복사강도에 의하여 ccd 카메라가 포화되는 것을 방지하였다. 또한 일정 범위의 광만을 받아들이기 위하여 띠투과필터 (band pass filter, 중심파장 : 700 nm, 반띠폭 : 10 nm)를 줌렌즈 앞에 부착하였다. ccd 카메라에 잡힌 상을 디지털 이미지 보드를 통하여 컴퓨터에 저장한 후, 자체 제작한 s/w를 이용하여 영상처리 하였다. 그리고 용융면에서 발생된 Gd 증기에 의하여 ccd 카메라로 들여다보는 창이 코팅되어 투과량의 변화가 생기는 것을 방지하기 위하여 그림 1과 같이 진공용기의 내부에 설치된 반사경을 사용하였다. 이와 같이 반사경을 이용하면 10 kW 범위에서 수 시간 동안 일정한 출력의 전자빔에 의하여

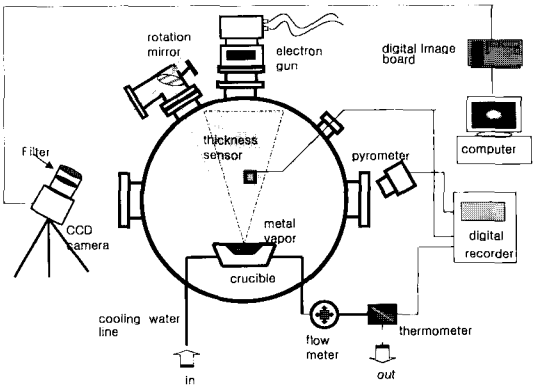


그림 1. ccd 카메라에 의한 용융면 측정 실험장치 개념도.

용융시킬 때, 용융면으로부터 ccd 카메라에서 받아들이는 방사강도의 변화는 없었다. 용융면이 일정 상태로 유지되는 것을 확인하기 위하여 박막두께측정기 (thickness monitor, Inficon, XTC)를 이용하여 용융면에서 일정 높이 떨어진 지점에서 원자증기양을 측정하였다. 또한 도가니를 통과하는 냉각수의 온도를 측정하여 용융면이 평형상태에 도달한 후 실험하였다.

3. 실험 결과

3.1 ccd 카메라를 이용하여 측정한 용융면

그림 2는 Gd 금속이 녹기 시작하는 근처의 출력인 2 kW 에서 전자빔을 시료의 면에 focusing 한 상태에서 촬영한 Gd 용융면이다. 이때 구경 f 값은 8 이며 흡광도가 3.00인 필터를 사용하였다. 사용된 띠투과필터 (band pass filter)의 중심파장은 690 nm 이며, 밴드폭은 10 nm 이다. 참고로 방사강도 세기의

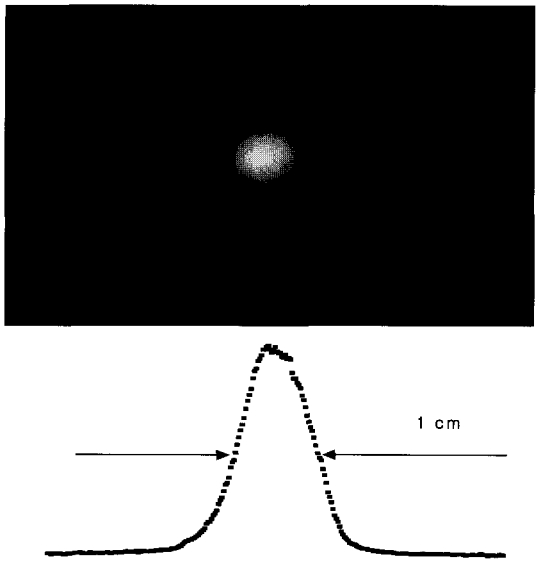
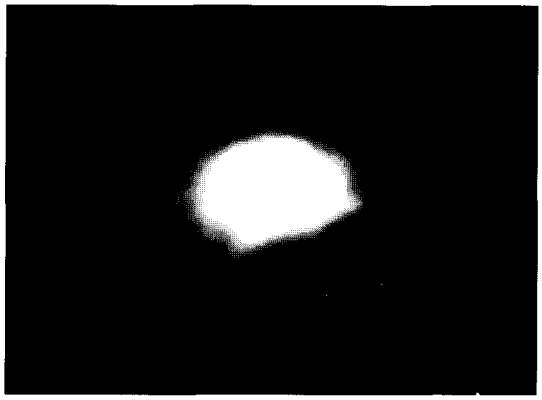


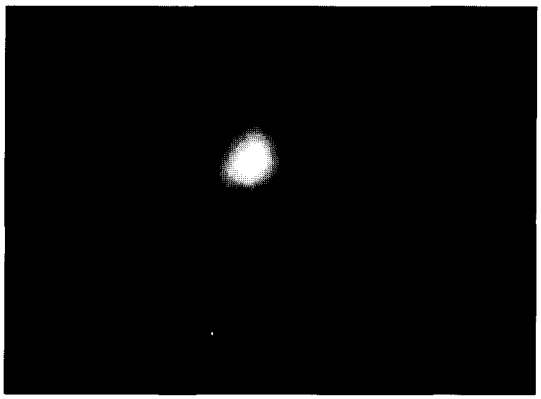
그림 2. 상단의 사진은 전자빔 출력 3 kW 일 때 ccd 카메라로 측정한 Gd 금속의 용융면임. 하단의 그림은 3.00의 흡광도필터와 f=11 의 구경을 통과하여 ccd 카메라로 촬영한 방사강도의 상대적인 크기이며, 위의 사진에서 최고로 높은 온도를 나타내는 지점을 횡축으로 통과하는 축을 따른 변화량임.

반 띠폭 (half-bandwidth)에 해당하는 용융면의 직경은 아래 화살표 부분에 표시한 바와 같이 1 cm 이다.

아래 그림 3은 전자빔 출력 5 kW에서 zoom lens 의 f number를 변화시키면서 촬영한 용융면이다. 촬영면을 흑백으로 했을 경우 온도가 시각적으로 들어오지 않기 때문에, s/w를 사용하여 용융면 상에서 동일한 온도일 경우 같은 색깔을 띄게 하였다. 이와 같이 용융면의 상을 채색하면 시각적인 효과가 있으며, 이를 이용하면 용융면에서 전자빔이 focusing 되는 정도를 확인할 수 있다. 본 software를 이용하면 가장 높은 지점을 찾아 그 지점을 지나는 축을 각 각 x-y 축으로 하여 그 축에 대응되는 지점의 상대적인 온도를 추정할 수 있다. 그 각 축 상에서의



(a)



(b)

그림 3. 전자빔 출력 5 kW에서 전자빔을 모음점조정할 때 (f=8 (a)의 사진, f=22(b)의 사진) ccd 카메라로 촬영한 Gd 용융면. 모두 동일한 흡광도필터를 사용함.

수광된 방사강도의 세기는 ascii 파일로 저장 할 수 있으며, 이를 불러들여 절대적인 온도를 표시할 수 있다.

3.2 ccd 카메라로 받아들인 방사강도로부터 용융면 온도 분포 추정 [4]

위와 같이 얻은 상으로부터 온도분포를 얻기 위하여 우선 직교하는 두 축 (x, y)을 정하여 그 축 상에서 방사강도의 세기를 얻었다. 용융점 온도 1312 (
일 때 용융면 방사강도의 세기 [$L_\lambda(T_r)$]와 임의의 온도에서 용융면 방사강도의 세기 [$L_\lambda(T)$]의 비를 구하면 다음과 같다.

$$Q=\frac{L_\lambda(T)}{L_\lambda(T_r)}=\frac{\int \varepsilon(\lambda,T)\ P(\lambda,T)\ d\lambda}{\int \varepsilon(\lambda,T_r)\ P(\lambda,T_r)\ d\lambda} \qquad (1)$$

위 식에서 $\varepsilon(\lambda, T)$는 사용된 필터의 중심 파장 (λ)과 용융면 온도 (T)에서의 방사율(emissivity)이며, P (λ, T)는 Planck's equation으로 이상적인 흑체복사인 경우 $\nu \sim \nu + d\nu$ 영역에서 복사강도는 다음과 같이 표현된다.

$$E_b(\nu, T)d\nu=\frac{8\pi h\nu^3}{c^2}\{\exp(h\nu/kT)-1\}^{-1} \qquad (2)$$

위의 식은 온도가 3000 K 이하이고, 가시광선 영역에서 $h\nu \gg kT$를 이용하면 아래와 같이 근사할 수 있다. 단, c는 광속, h는 프랑크 상수 그리고 T는 절대온도이다.

$$E_b(\nu, T)d\nu=\frac{8\pi h\nu^3}{c^2}\left\{\exp(h\nu/kT)\right\}^{-1} \qquad (3)$$

만일 임의의 온도에서 $\varepsilon(\lambda, T)$와 용융점의 $\varepsilon(\lambda, T_r)$가 동일하고, 사용된 필터의 중심파장에서 Gd 원자가 여기상태에서 바닥상태로 떨어지면서 내는 방출에 의한 형광 파장이 없다면 위의 식을 이용하여 용융면 온도를 구할 수 있다.

$$T=\frac{1}{\frac{1}{T_r}-\left(\frac{\lambda_e}{c_2}\right)\ln Q} \qquad (4)$$

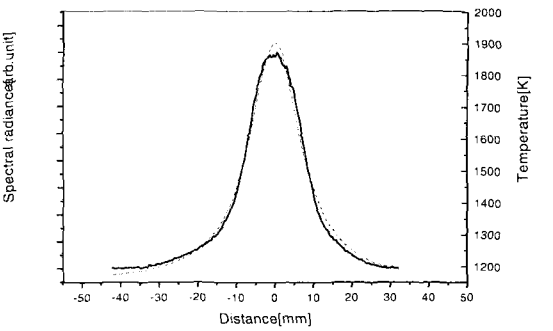


그림 4. 전자빔 출력 3.0 kW로 Gd를 용융할 때, ccd 카메라로 촬영한 복사강도와 식 (5)를 이용하여 계산한 온도(실선)이고, 점선은 Lorentzian profile을 이용하여 fitting한 값임.

그림 4는 Gd 시료가 녹기 시작하는 전자빔 출력 2 kW에서 방사강도 $L_\lambda(T_r)$를 구하고, 전자빔 출력이 3 kW 일 때 방사강도 $L_\lambda(T)$를 구한 뒤, 그 비율식(4)의 Q 값)을 정하였다. 이 때 사용한 필터의 중심파장은 700 nm 이다. 위의 식에 주어진 상수를 적용하면 식은 다음과 같다.

$$T=\frac{1}{\frac{1}{1585}-\frac{700*10^{-7}}{1.438}\ln Q} \qquad (5)$$

3.3 전자빔 출력에 따른 용융면 직경의 변화

전자빔 출력에 따른 용융면 직경의 크기를 구하기 위하여, 용융면에서 발생하는 방사강도를 측정하였다. 이 때 각각의 출력에 맞추어 줌렌즈 구경과 흡광도필터를 사용하였다. 이와 같이 서로 다른 흡광도필터와 카메라 구경을 사용한 이유는 용융면에 입사하는 전자빔의 출력이 증가할수록 용융면에서 발생하는 방사강도가 커지고, 그에 따라 ccd 카메라의 전기신호가 방사강도에 비례하여 늘어나지 못하게 되는 경우가 발생하기 때문이다. 따라서 적절한 흡광도필터와 카메라의 줌렌즈 구경을 조절하여 ccd 카메라의 소자가 포화되지 않게 하였다. 투과율 (transmittance)을 T라고 할 때, 흡광도필터의 흡광도는 $\log_{10}(1/T)$로 정의된다. 참고로 본 실험에 사용된 흡광도필터는 각각 0.5, 1.00, 2.00, 3.00 일 때 투과율은 각 각 31.6 %, 10 %, 1 %, 0.1 % 이다.

그림 5는 전자빔의 출력을 변화시킬 때 용융면으

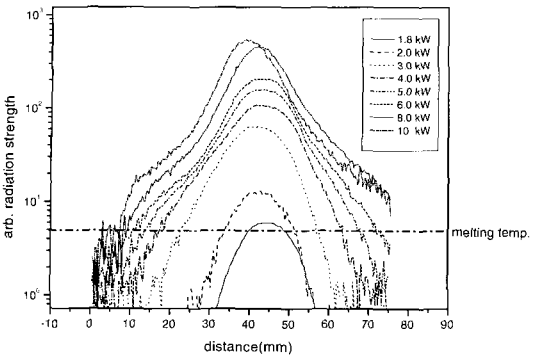


그림 5. 전자빔 출력을 증가시키면서 관측한 ccd 카메라에서 받아들인 방사강도의 변화. 각 각의 실험치는 Gd 용융점 온도(1312℃)에서 측정된 조건인 흡광도가 0.5와 구경 8에 대하여 표준화한 크기임.

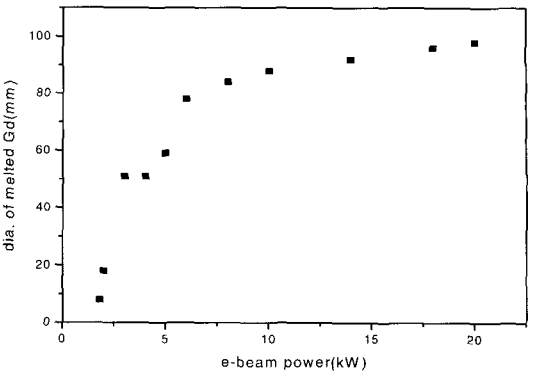


그림 6. 전자빔 출력에 따른 Gd 금속 용융면의 용융된 직경의 변화. 용융된 면의 크기는 Gd 금속의 용융점(1312 ℃)보다 방사강도의 크기가 큰 지점까지로 함.

로부터 수광된 상대적인 방사강도의 변화이다. Gd 금속이 녹기 시작하는 온도 (1312 ℃)에서 방사강도의 세기 (그림 5의 굵은 일점쇄선)에 대한 비를 구하기 위하여, 각기 다른 투과율 (transmittance : T)과 줌렌즈의 구경(F)를 사용한 실험치에 다음 factor를 곱하였다. 아래 식에서 T_0와 F_0는 용융이 시작되는 전자빔 출력에서 사용된 투과율과 구경 값이다.

시료가 용융점 온도일 때 방출하는 방사강도의 세기와 비교하여 환산된 방사강도

= 실험에서 얻은 방사강도$\times(T/T_0)\times(F/F_0)^2$

그림 5에는 용융점에 해당하는 방사강도를 표시하는 일점쇄선이 그어져 있는데, 이것으로부터 각각의 전자빔 출력에서의 시료 용융면의 직경을 구하여 그림 6에 표시하였다. 용융면의 크기는 전자빔의 출력이 증가함에 따라 동시에 증가하는 경향을 보이고 있다. 전자빔 출력이 20 kW에서는 용융면 직경의 크기는 100 mm 이다. 이 값은 도가니의 폭에 해당하며, 전자빔을 모음점조정하면 현재 사용하는 도가니의 전 크기를 활용함을 알 수 있다. 또한 직경의 크기 전자빔 크기가 10 kW 까지는 그 증가율이 그 이상의 전자빔 출력에서보다 크다. 이는 10 kW 이상에서 용융면이 도가니와 닿는 면적이 증가하여 도가니에서 발생하는 열이 냉각수에 의하여 방출되기 때문이다.

그림 7은 ccd 카메라와 2색 적외선온도계 (2-color pyrometer)를 사용하여 측정한 결과의 비교한 그래프이다. 참고로 적외선 온도계는 Gd가 용융되는 지점을 기준으로 눈금맞추기 (calibration)을 하였다. 전자빔의 출력이 2 kW 일 때 9 μm 영역을 사용하는 2색 적외선온도계로 측정한 온도가 1700 K 내외인 것에 비하여 현재의 환산된 값이 1800 K로 100 K 더 높은 수치를 보이고 있다. 그리고 전자빔의 출력이 증가할수록 그 차이가 점점 증가하다가 다시 10 kW 내외에서는 줄어들고 있다. 이유로는 다음과 같이 몇 가지를 고려할 수 있다. 첫 째, 2색 적외선온도계는 모음점조정할 때, 어떤 면적의 값을 평균하여 읽어 들인다. 즉, 적외선온도계의 광학계를 통하여 얻을 수 있는 이론상의 최소한의 직경은 3.5 mm 이다. 그러나 ccd 쎈서에 망원렌즈를 부착한 온도측정

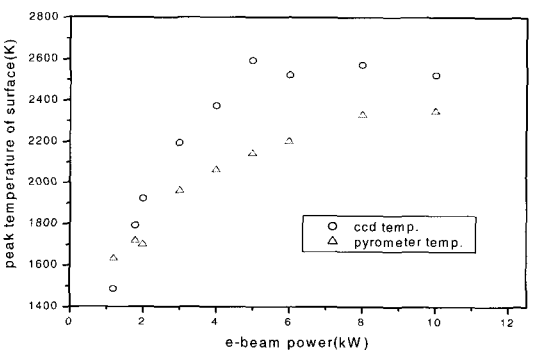


그림 7. 전자빔 출력에 따른 2 color pyrometer(△)와 ccd 카메라(◯)를 이용하여 측정한 Gd 용융면의 최고점 온도 비교.

시스템의 분해능은 그보다 훨씬 뛰어나다. 따라서 기존의 적외선온도계에 표시되는 평균한 값보다 ccd 카메라로 읽은 값의 최대치는 크다. 둘 째, 표면 최고온도를 구할 때 전자빔과 충돌하여 여기된 원자증기에 의하여 발생하는 형광이 없는 것으로 가정하였는데, 실제로는 필터를 통과한 방사강도의 상당 부분이 형광에 의하여 발생함을 알 수 있다. 따라서 본 실험을 정밀하게 하기 위하여 필터를 교환하여 측정하고, 그 후 각 여기 에너지 준위에서 바닥상태로 떨어지면서 방출하는 형광의 양을 정확하게 측정해야 할 것이다.

4. 토 론

최고출력 20 kW 동작하는 전자빔을 이용하여 Gd 용융면을 측정하였다. 용융면의 상은 ccd 카메라에 흡광도필터와 띠투과필터 등을 부착하여 용융면에서 발생하는 강한 방사광에 의하여 신호가 포화되는 것을 방지하였다. 이 값으로부터 Planck's equation을 사용하여 구한 용융면 최고점의 온도는 적외선 온도계로 측정한 값에 비하여 100~200 ℃ 높은 값을 보이고 있다. 앞으로 용융면의 정밀한 측정을 하기 위하여 표면온도에 따른 Gd의 방사율(emissivity) 측정이 필요하다 [5,6]. 결론적으로 본 장치를 이용하면 용융면 상태의 실시간 관측이 가능하다. 또한, 원자증기발생장치의 운용자가 기존의 방법과 달리 관측창이 오염되더라도 계속해서 내부를 들여다볼 수 있어 안정적인 동작에 기여할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

[1] S. Schiller, U. Heisig and S. Panzer, *Electron beam technology*(John Wiley & Sons, New York, 1982), pp. 150-254.

[2] V. J. Jabotinski and P. R. Taylor, Proceeding of the conference electron beam melting and refining state of the art 1997, (Englewood, New Jersey USA, 1997), pp. 148-162.

[3] C. Haynam, B. Comaskey, J. Conway, J. Eggert, J. Glaser, E. Ng, J. Paisner, R. Solarz, and E. Worden, SPIE **1858**, 24, 1993.

[4] H. Ohba and T. Shibata, Jap. J. Appl. Phys. **34**, 4235, 1995.

[5] E. A. Brandes, *Smithells metals reference book* (Butterworths, London, 1983), 6th ed., Chap. 17.

[6] D. T. F. Marple, J. opt. Soc. Amer. **46**, 490. 1956.